

BAB II

TEORI DASAR

2.1 Tinjauan Umum Batubara

Batubara merupakan batuan sedimen yang menjadi bahan bakar fosil yang terbentuk akibat endapan organik dengan bahan utamanya adalah sisa- sisa tumbuhan yang mengalami proses pembatubaraan. Perubahan yang ada pada kandungan tersebut diakibatkan karena ada tekanan dan suhu yang tinggi dan membentuk lapisan tebal sehingga lapisan tersebut menjadi padat dan mengeras (Mutasim,2007). Penyusun utama terdiri dari karbon, hidrogen, dan oksigen. Batubara bersifat fisika dan kimia yang kompleks dan dapat ditemui dalam banyak bentuk. Batubara banyak memiliki macam karbon terikat, bagian padat yang sudah terbakar akan mudah menguap. Batubara dapat ditemukan pada lapisan yang menyelip pada lapisan yang batuan yang lainnya. Jenis-jenis batubara memiliki empat golongan atau jenisnya. Keempat tersebut yaitu :

- a. Lignit, merupakan batubara yang memiliki persentase karbon yang terikat yang rendah dari keempat golongan yang ada. Tahap ini memiliki zat kadar volatil yang mudah menguap. Batubara muda ini memiliki warna coklat muda sampai ke tua.
- b. Sub-bituminus, jenis ini menunjukkan zat kayu apabila dilihat mata telanjang. Sub-bituminus memiliki zat lebih dari 40% karbon terikat
- c. Bituminus, batubara ini memiliki zat terikat sampai 70%, batubara bituminus dikenal dengan batubara yang lunak. Zat ini mudah tersundut api, dan menghasilkan bau yang bergantung pada zat zulfur yang ada.
- d. Antrasit, berasal dari bahasa Yunani yaitu *Anthrax*, berarti batubara. Batubara jenis antrasit merupakan batubara yang digolongkan paling baik dibandingkan golongan yang ada dan memiliki 90% karbon terikat dan memiliki zat sulfur yang rendah.

Tingkatan batubara ini dibuat untuk menentukan adanya kadar kandungan batubara yang terkandung, dan tingkatan lebih rendah dari antrasit akan lebih banyak mengandung hidrogen dan oksigen (Yunita, 2000).

2.2. Konsep Dasar Fisika Batuan

Fisika Batuan merupakan studi yang mempelajari properti fisika dari suatu batuan yang dapat dipelajari dan dianalisis dari pengukuran *well-log* maupun pengukuran yang berada di laboratorium dan didasari hukum fisika dan peramaan matematika. Penelitian menggunakan pemodelan fisika batuan yaitu untuk mendapatkan kecepatan gelombang S dengan melalui perhitungan gelombang P dari pendekatan persamaan kecepatan gelombang, yang mana gelombang P dari pendekatan dapat dikorelasikan dengan log gelombang P.

2.3. Prinsip Dasar Well-Logging

Log merupakan suatu nilai grafik kedalaman atau waktu dari suatu kumpulan data yang menunjukkan parameter yang diukur secara berkesinambungan di dalam sebuah sumur pemboran (Harsono, 1997). Prinsip dasar *wireline log* adalah mengukur parameter sifat-sifat fisik dari suatu formasi pada setiap kedalaman secara kontinyu dari sumur pemboran. Adapun sifat-sifat fisik yang diukur adalah potensial listrik batuan atau kelistrikan, tahanan jenis batuan, radioaktivitas, kecepatan rambat gelombang elastis, kerapatan formasi (densitas), dan kemiringan lapisan batuan, serta kekompakan formasi yang kesemuanya tercermin dari lubang bor. *Well logging* adalah suatu teknik untuk mendapatkan data bawah permukaan menggunakan alat ukur yang dimasukkan ke dalam lubang bor untuk evaluasi formasi dan identifikasi dari ciri-ciri batuan di bawah permukaan (Schlumberger, 1989). *Well Logging* dapat dilakukan dengan dua cara dan bertahap, yaitu:

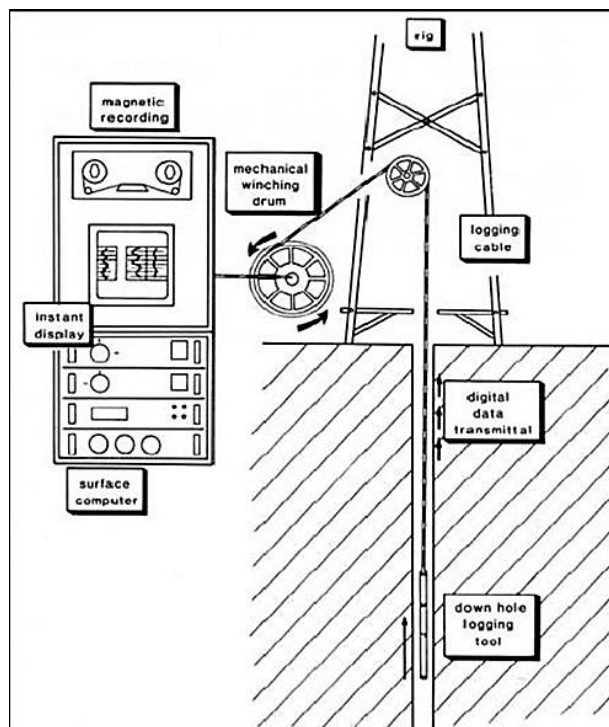
a. *Openhole Logging*

Openhole logging ini merupakan kegiatan *logging* yang dilakukan pada sumur/lubang bor yang belum dilakukan pemasangan casing. Pada umumnya pada tahap ini semua jenis log dapat dilakukan.

b. *Casedhole Logging*

Casedhole logging merupakan kegiatan *logging* yang dilakukan pada sumur atau lubang bor yang sudah dilakukan pemasangan casing. Pada tahapan ini hanya log tertentu yang dapat dilakukan antara lain adalah log *Gamma Ray*, Caliper, NMR, dan CBL.

Secara kualitatif dengan data sifat-sifat fisik tersebut kita dapat menentukan jenis litologi dan jenis fluida pada formasi yang tertembus sumur. Sedangkan secara kuantitatif dapat memberikan data-data untuk menentukan ketebalan, porositas, permeabilitas, kejenuhan fluida, dan densitas batubara.



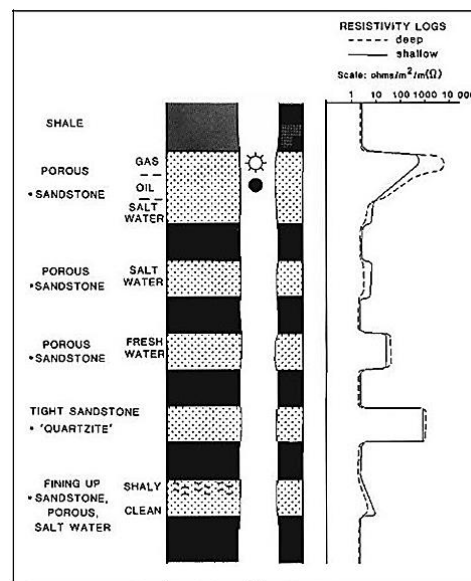
Gambar 2.1 *Open hole logging dan casedhole logging*

2.3.1 Jenis-Jenis *Logging*

Sebagai alat *logging* dan metode penafsiran yang berkembang dalam hal keakurasian dan kecanggihan, memang memegang peran penting dalam proses pengambilan keputusan geologi. Sampai pada saat ini, interpretasi log petrofisika adalah salah satu alat yang paling berguna dan penting yang dapat dimanfaatkan oleh seorang ahli geologi minyak bumi (Asquith dkk, 1976)

a. Log Resistivitas

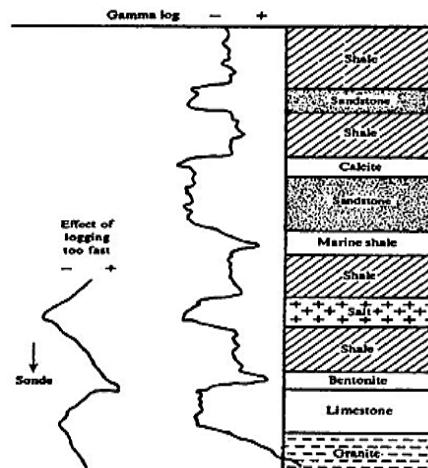
Resistivitas atau tahanan jenis suatu batuan adalah suatu kemampuan batuan untuk menghambat jalannya arus listrik yang mengalir melalui batuan tersebut (Darling, 2005). Nilai resistivitas rendah apabila batuan mudah untuk mengalirkan arus listrik, sedangkan nilai resistivitas tinggi apabila batuan sulit untuk mengalirkan arus listrik. Log Resistivity digunakan untuk mendeterminasi zona batubara dengan zona fluida, mengindikasikan zona permeabel dengan mendeterminasi porositas resistivitas. Alat-alat yang digunakan untuk mencari nilai resistivitas (R_t) terdiri dari dua kelompok yaitu Laterolog dan Induksi. Yang umum dikenal sebagai log R_t adalah LLd (***Deep Laterolog Resistivity***), LLS (***Shallow Laterolog Resistivity***), Ild (***Deep Induction Resistivity***).



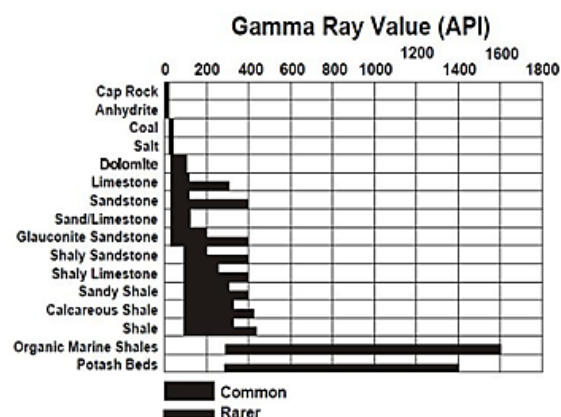
Gambar 2.2 Log Resistivitas

b. Log *Gamma Ray*

Log *Gamma Ray* merupakan suatu kurva yang menunjukkan besaran intensitas radioaktif yang ada dalam formasi. Log ini bekerja dengan merekam radiasi sinar gamma alamiah batuan, sehingga berguna untuk mendeteksi/mengevaluasi endapan-endapan mineral radioaktif seperti Potasium (K), Thorium (Th), atau bijih Uranium (U). Pada batuan batubara memiliki sedimen unsur radioaktif yang rendah dan memiliki intensitas yang berasal dari mineral-mineral batubara. Batubara memiliki nilai *Gamma Ray* yang cukup rendah. *Gamma Ray* yang mempunyai harga minimum dan garis *Gamma Ray* maksimum pada suatu penampang log, maka kurva tersebut merupakan indikasi adanya lapisan batubara. *Gamma Ray* log dinyatakan dalam API Units (GAPI).



Gambar 2.3 Log *Gamma Ray*



Gambar 2.4 Nilai *Gamma Ray* terhadap litologi

c. Log Densitas

Log densitas merupakan kurva yang menunjukkan besarnya densitas (*bulk density*) dari batuan yang ditembus lubang bor dengan satuan gram/cm³. Prinsip dasar dari log ini adalah menembakkan sinar gamma kedalam formasi, dimana sinar gamma ini dapat dianggap sebagai partikel yang bergerak dengan kecepatan yang sangat tinggi. Banyaknya energi sinar gamma yang hilang menunjukkan densitas elektron di dalam formasi, dimana densitas elektron merupakan indikasi dari densitas formasi. *Bulk density* merupakan indikator yang penting untuk menghitung porositas bila dikombinasikan dengan kurva log neutron, karena kurva log densitas ini akan menunjukkan besarnya kerapatan medium beserta isinya. Batubara memiliki nilai densitas yang rendah karena akibat dari tekanan dan suhu yang tinggi, maka porositas yang dihasilkan pada batubara akan bernilai rendah. Semakin rendah densitas yang ada, maka kualitas yang dihasilkan dari batubara makin baik.

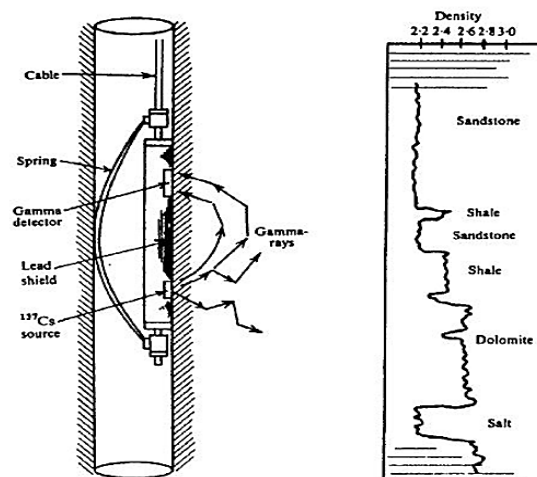
$$(\phi) = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (1)$$

ϕ = porositas

ρ_{ma} = densitas matriks

ρ_b = bacaan log densitas

ρ_{ma} = densitas fluida



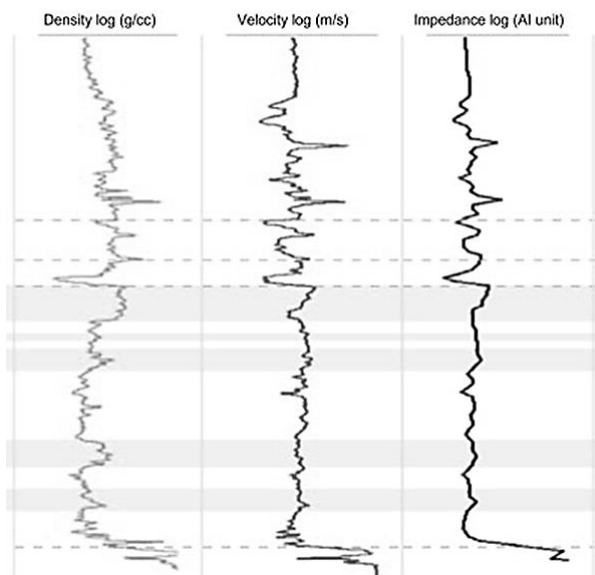
Gambar 2.5 Log Densitas

d. *Log P-Wave Velocity (V_p)*

Log V_p merupakan log untuk mengukur kecepatan waktu tiba kedatangan dari gelombang yang melalui dari formasi suatu batuan, biasanya log V_p digunakan untuk mencari nilai porositas. Interval kecepatan juga bergantung pada litologi dan porositas yang dilalui dari log tersebut, kecepatan matriks batuan diketahui dahulu untuk dijadikan bahan acuan. Log V_p dari litologi batuan batubara berkisar dari 2000 m/s sampai 3000 m/s. Dikarenakan batubara memiliki densitas yang cenderung kecil karena berkaitan dengan porositas dari batubara yang memiliki persentase yang rendah.

d. *Log Acoustic Impedance (AI)*

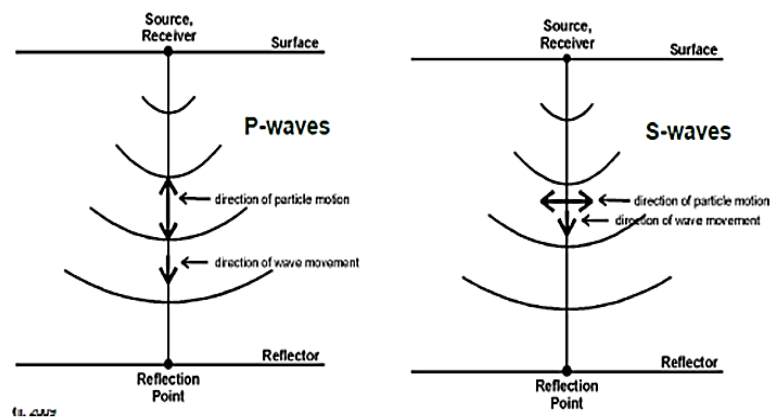
Log AI merupakan log hasil perhitungan yang berasal dari Densitas dikali dengan $P - Wave Velocity$ dan menghasilkan *log Acoustic Impedance*. Hasil dari log AI ini memiliki nilai *trend* yang cukup sama dengan $P - Wave Velocity$, sehingga kita dapat simpulkan bahwa kecepatan dan densitas yang akan dihasilkan tidak akan terlalu tinggi dan berkisar 3000 m/s gr/cc sampai 5000 m/s gr/cc. Nilai tersebut juga akan memperlihatkan kondisi dari batubara yang dilihat dari kualitas batubara yang diperlihatkan pada log AI.



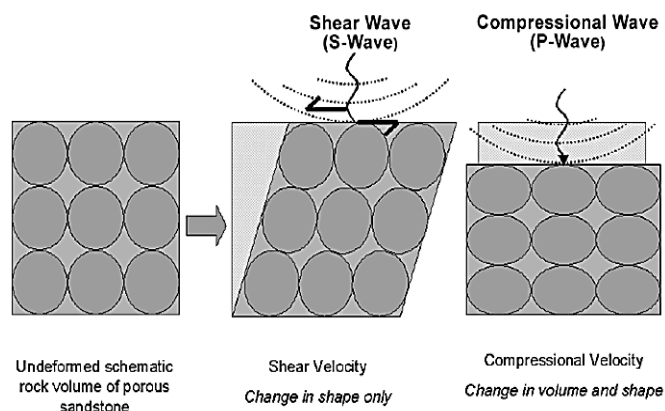
Gambar 2.6 Log V_p & Accoustic Impedance

2.3.2 Hubungan Gelombang P dan Gelombang S

Kecepatan gelombang seismik berkaitan dengan deformasi batuan dalam fungsi waktu. Seperti gambar di bawah ini yang menunjukkan batuan yang terkompresi dan volumenya berubah juga *sheared*, yang mana terjadi perubahan bentuk saja namun tidak terjadi perubahan volumenya. Dalam persamaan gelombang P dan gelombang S) hubungan relatif antara kecepatan gelombang P dan gelombang S ditunjukkan dalam *Poisson's Ratio*. Variasi nilai 0 hingga 0.5 dengan batas atas yang mewakili fluida ($\mu=0$). Sementara untuk *Poisson* padat $\sigma=0.25$ (Shearer, 2009). Nilai $\sigma=0.1$ (*gas case*), $\sigma=1/3$ (*wet case*) .Tatham (1982) menyatakan hubungan antara V_p/V_s secara khusus sensitif terhadap fluida pori dalam batuan sedimen.



Gambar 2.7 Arah Perambatan Gelombang (Hampson & Russel, 2009)



Gambar 2.8 Deformasi batuan akibat V_p & V_s

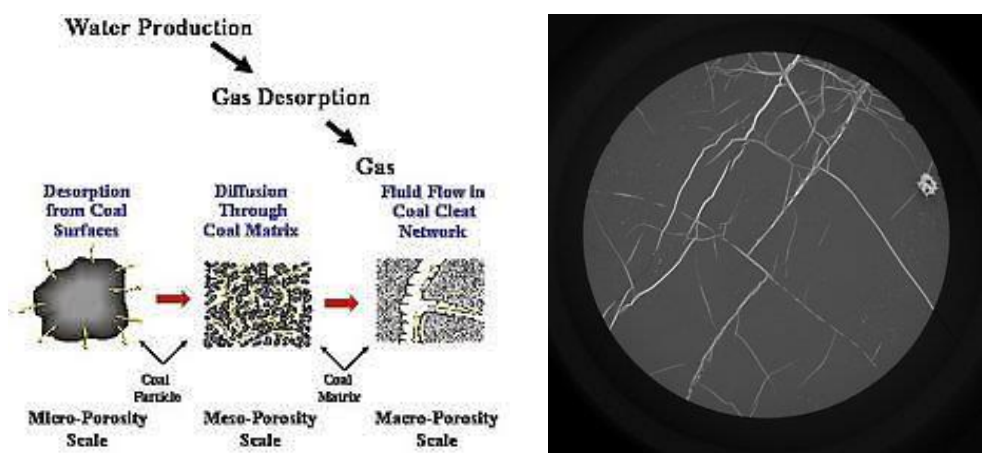
2.3.3. Porositas

Porositas adalah bagian dari volume total batuan yang berpori. Merupakan perbandingan antara volume rongga kosong dengan persentase dari volume total dari batubara.

$$\text{Porositas } (\phi) = \frac{\text{Volume Pori}}{\text{Volume Total}} \times 100 \quad (2)$$

Besar porositas dipengaruhi faktor yaitu :

- Tatanan butir, butir yang saling bersentuhan dan termampatkan sehingga pori-pori yang ada pada batuan batubara menjadi lebih kecil, batubara yang baik yaitu batubara golongan antrasit memiliki porositas yang sangat kecil dibanding keempat golongan batubara.
- Ukuran dan bentuk butir, memiliki butir mineral yang sama dan membulat semakin mampat maka ruang antar butir tersebut akan semakin kecil.
- Keseragaman butir, apabila butir tersebut kecil maka butir tersebut akan mengisi rongga antar butir sehingga porositas juga akan semakin mengecil.



Gambar 2.9 Model porositas dan sample porositas pada lapangan

2.3.4. Densitas

Densitas merupakan massa dibagi volume atau massa persatuan volume dengan satuan (gr/cc atau kg/m³). Densitas dipengaruhi adanya persentase antara jumlah mineral, bentuk butir (matriks), porositas batuan dan fluida pengisi batuan. Apabila batuan tersebut memiliki jenis mineral dan diketahui keseluruhan matriks batuan dimana terdapat fluida pengisi pori batubara, bisa gas dan bisa air. Persamaan Wyllie dapat digunakan untuk menentukan densitas dan kecepatan (Hampson dan Rusell, 2004).

$$\rho_{sat} = \rho_{bt}(1 - \phi) + \rho_f \quad (3)$$

ρ_{sat} = Densitas Saturasi

ρ_{bt} = Densitas Batubara

ρ_f = Densitas Fluida

ϕ = Porositas Batuan

2.3.5. Hubungan Empiris Antara *Velocity* dan Densitas

Dalam penelitian AVO ini terdapat dua cara untuk menghasilkan kecepatan gelombang P dari densitas (dan atau densitas yang diperoleh dari kecepatan gelombang P). Dalam persamaan Gardner dan persamaan Lindseth yang ditunjukkan sebagai berikut:

$$\rho = aV^b \quad (4)$$

Secara empiris nilai tersebut diperoleh dari range batuan sedimen. Dimana nilai a dan b ditentukan oleh fittingregresi. Persamaan kedua, yaitu persamaan Lindseth yang menunjukkan kecocokan linear antara kecepatan dan impedansi akustik yang dituliskan sebagai berikut:

$$V = a(\rho V) + b \quad (5)$$

Secara empiris nilai diturunkan dari Lindseth (1979), sehingga dari keduanya dapat dituliskan dalam hubungan fungsional antara V dan ρ sebagai berikut:

$$\Delta t = c - d\rho \quad (6)$$

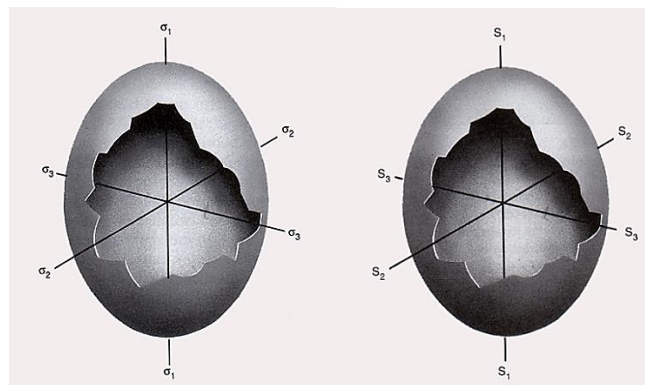
Dimana : $\Delta t = 1/V$; $c = 1/b$; $d = a/b$

2.4. Elastisitas Batuan

Perambatan gelombang seismik pada batuan dapat digunakan untuk karakterisasi gaya internal dan deformasi pada material batuan tersebut. Deformasi secara tiga dimensi diistilahkan sebagai strain dan gaya internal yang bekerja pada bagian material tersebut disebut stress, yang berhubungan dengan elastisitas benda padat (Shearer et al, 2009)

a. Stress dan Strain

Stress yaitu gaya yang bekerja terhadap satuan luas (*Force/Area*). *Stress* terdiri dari dua komponen, yang pertama yaitu *right angle to surface* (normal atau *dilatation stress*) dan yang kedua yaitu pada bidang *surface* (*shear stress*). *Strain* yaitu hasil deformasi akibat gaya **stress** tersebut yang ditunjukkan sebagai perubahan panjang (atau volume). Berdasarkan *Hooke's Law*, *stress* dan *strain* tersebut bergantung secara linear λ dan batuan akan bersifat plastis dan *ductile*. Dua Parameter *Lame* secara lengkap mendeskripsikan hubungan linear *stress-strain* dalam *isotropic solid* (Shearer, 2009).



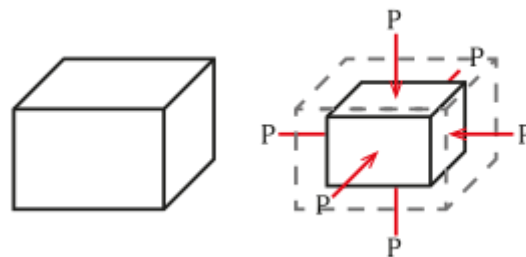
Gambar 2.10 Stress dan Strain

b. Modulus *Bulk* dan Modulus *Shear*

Elastisitas dari mineral merupakan penggambaran ketahanan dari mineral batuan yang telah mengalami respon akibat adanya penjarangan gelombang yang telah diwakilkan oleh *bulk* modulus dan *shear* modulus. *Bulk* modulus merupakan perbandingan antara *stress-strain* dengan gaya kompresional yang diberikan oleh benda. Gaya tersebut mengenai permukaan *body* sehingga batuan akan mengalami *stress* yang ditimbulkan dan pada akhirnya akan menghasilkan efek yang terjadi yaitu *strain* atau perubahan volume. *Bulk* modulus juga bisa disebut inkompresibilitas, dengan defisini yaitu ketahan batuan terhadap gaya yang diberikan.

$$K = \frac{F/A}{\Delta V/V} \quad (7)$$

- K = *bulk* modulus (GPa)
 F = gaya kompresional (N)
 A = luas area (m^2)
 V = volume awal (m^3)
 ΔV = selisih perubahan volume (m^3)



Gambar 2.11 Gaya kompresional pada batuan.

Modulus *shear* adalah konstanta perbandingan antara *stress-strain* terhadap gaya geser, gaya geser tersebut mengenai *body* dari batuan, sehingga menghasilkan *stress* yang akan menjadi suatu *strain* berupa perubahan yang akan terlihat pada panjang permukaan yang bergeser. Modulus *shear* biasa disebut juga *rigidity* yang dimana diartikan sebagai ketahanan *body* batuan terhadap *shear stress*. Modulus *shear* ini dinyatakan

persamaan :

$$\mu = \frac{F/A}{\Delta x/h} \quad (8)$$

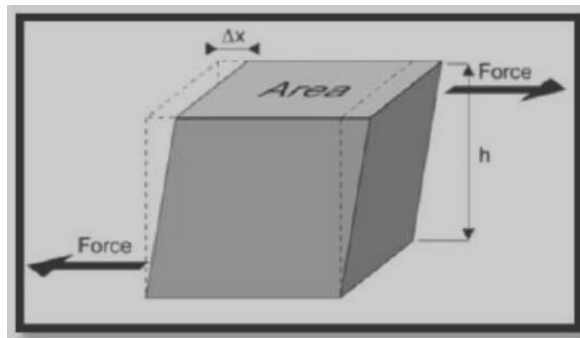
μ = shear modulus (GPa)

F = gaya geser (N)

A = luas area (m^2)

h = perubahan panjang bodi batuan yang sejajar dengan F (m)

Δx = panjang bodi batuan tegak lurus F (m)



Gambar 2.12 Gaya shear pada batuan.

c. *Poisson's Ratio*

Rasio adalah perbandingan antara kontraksi lateral terhadap regangan longitudinal. Ketika gaya tersebut diberikan kepada material tersebut maka akan menghasilkan regangan dan membuat material tersebut menjadi terdeformasi, dan perubahan silinder yang di tarik di kedua ujungnya terhadap ekstensi longitudinal, yang ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\nu = \frac{d_{transversal}}{d_{axial}} = -\frac{d\epsilon_y}{d\epsilon_x} = -\frac{d\epsilon_z}{d\epsilon_x} \quad (9)$$

ν = Poisson Ratio

d_{axial} = regangan axial (positif untuk gaya axial tarik, dan negatif untuk aksial tekan)

$d_{transversal}$ = regangan transversal (positif untuk gaya aksial tarik, dan negatif untuk aksial tekan)

2.5 Pemodelan Fisika Batuan

Pemodelan fisika batuan merupakan salah satu bentuk pemodelan kedepan dalam memodelkan suatu batuan. Pemodelan ini membutuhkan kerangka untuk mengenai tahapan pemodelan tersebut sehingga mendapatkan parameter yang diinginkan, dalam penelitian ini mencari nilai gelombang S dengan menggunakan korelasi antara gelombang P prediksi dengan log gelombang P

2.5.1 Pemodelan Kerangka *Solid Rock*

Solid rock merupakan gabungan dari suatu fasa batuan berupa matriks yang merupakan campuran mineral yang tergabung menjadi satu sehingga menjadi penyusun dari batuan tersebut. Pada model ini *solid rock* ini tidak melibatkan inklusi dan fluida, karena pada hal ini beranggapan bahwa solid rock merupakan murni dari batuan itu saja tanpa memiliki porositas ($\phi=0$). Pemodelan kerangka *solid rock* menggunakan pendekatan Pride.

2.5.1.1 Pendekatan Pride

Pendekatan Pride merupakan yang didapatkan secara umum melalui pengukuran di laboratorium Murphy et al., 1993, dengan persamaan sebagai berikut.

$$Kd = \frac{Kma(1-\phi)}{(1+\alpha\phi)} \quad (10)$$

dan

$$\mu d = \frac{\mu ma(1-\phi)}{(1+1.5\alpha\phi)} \quad (11)$$

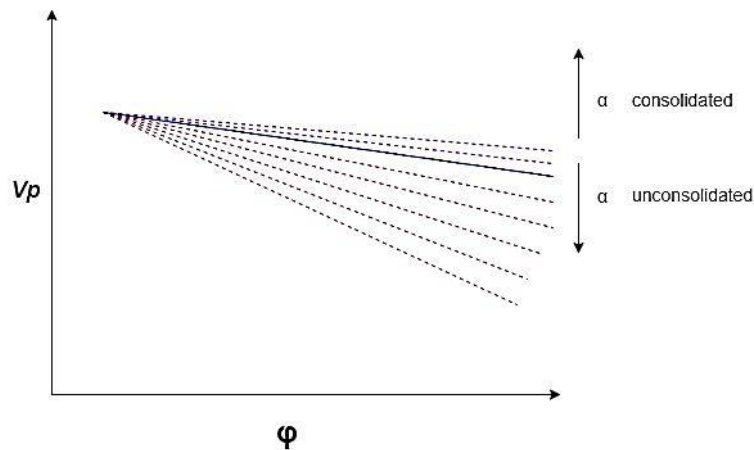
Kd & μ_d = modulus *bulk* dan shear batu

Kma & μ_{ma} = modulus bulk dan shear butir

ϕ = Porositas

α = Parameter konsolidasi

Pendekatan Pride ini digunakan untuk mencari nilai dari modulus *bulk* dan modulus *shear* dari batuan, sehingga dari persamaan pendekatan Pride dapat dilakukan pemodelan menggunakan kerangka *solid rock* dengan beranggapan bahwa porositas batuan tidak ada. Adanya parameter konsolidasi digunakan sebagai parameter untuk menentukan tingkat konsolidasi suatu batuan. Untuk batuan yang lebih terkonsolidasi maka memiliki nilai α yang lebih kecil dibandingkan batuan yang kurang terkonsolidasi



Gambar 2.13 Kerangka *Solid Rock* untuk menentukan faktor konsolidasi

2.5.1.2 Persamaan Lee

Persamaan Lee merupakan persamaan untuk menggenalisir persamaan untuk mendapatkan nilai dari modulus shear maka, Lee(2005) membuat persamaan dari modulus shear dari *dry rock* dengan menggunakan nilai γ sehingga mendapatkan nilai dari modulus shear dengan persamaan

$$\mu_{dry} = \mu_{sat} \frac{\mu_{min}(1-\phi)}{(1+\gamma\alpha\phi)} \quad (12)$$

dimana

$$\gamma = \mu_{sat} = \frac{1+2\alpha}{1+\alpha} \quad (13)$$

Ketika $\alpha = 1$, $\gamma = 1.5$, yang identik dengan persamaan kedua. Nilai γ akan berbeda seiring dengan faktor konsolidasi yang akan dimasukkan kedalam persamaan tersebut. Faktor konsolidasi ini akan berperan pada saat pemodelan kerangka *solid rock*.

2.5.2 Prediksi Kecepatan Gelombang

Kecepatan elastis pada frekuensi rendah yaitu, kecepatan gelombang-P dan kecepatan gelombang S dari batuan sedimen jenuh air dapat terjadi dihitung dari teori Gassmann jika moduli batuan kering adalah dikenal; Namun, dalam kerangka poroelastik, moduli kering bingkai tidak ditentukan dan harus ditentukan apriori.

Kecepatan gelombang P dapat dinyatakan dengan :

$$V_p = \sqrt{\frac{K_{dry} + \frac{4}{3}\mu_{dry}}{\rho}} \quad (14)$$

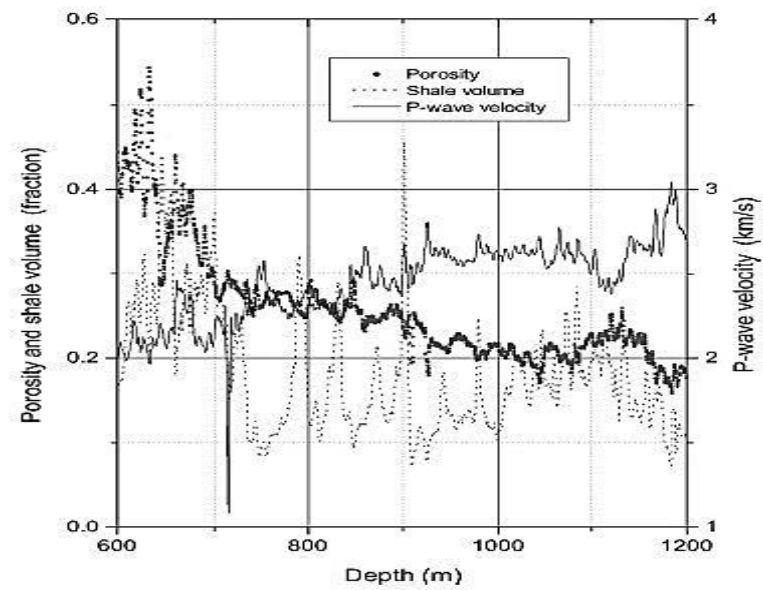
Kecepatan gelombang S :

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu_{dry}}{\rho}} \quad (15)$$

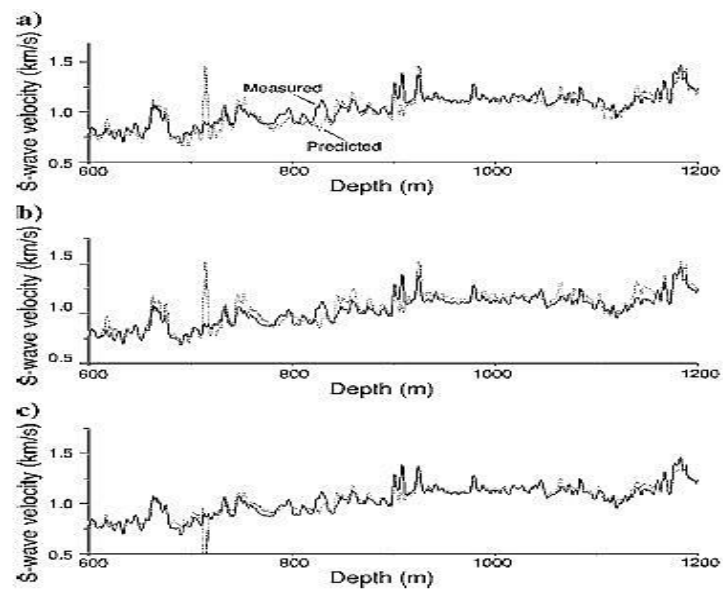
Persamaan 1 dan 3 dapat digunakan untuk memprediksi V_s dari V_p dan juga porositas dari saturasi air *sandstone* karena parameter modul bulk dan moduus shear. Definisi kecepatan dapat diprediksi dengan menggunakan persamaan biot gassman, dengan persamaan 1 dan 3 sebagai V_p , Parameter konsolidasi dapat dihitung dengan persamaan :

$$V_p(\alpha) - V_p = 0 \quad (16)$$

Oleh karena itu, modulus geser dapat dihitung menggunakan persamaan 3 oleh parameter konsolidasi yang diperkirakan dari persamaan 5 menjadi persamaan 3 dan 4. Kecepatan gelombang S dapat dihitung dari V_s persamaan yang ke 6.



Gambar 2.14 Gambar data untuk memprediksi gelombang S



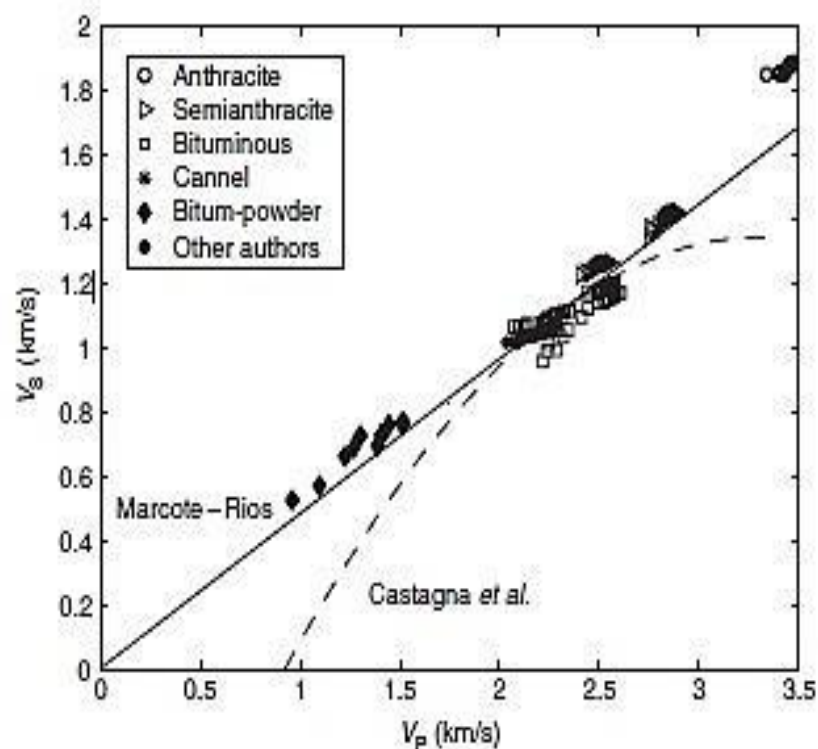
Gambar 2.15 Perbandingan antara kecepatan gelombang S dari kecepatan gelombang P dan porositas

2.5.3 Persamaan Castagna Batubara

Persamaan castagna merupakan prediksi yang didapatkan untuk mencari nilai dari hubungan antara V_p dan V_s dalam penentuan litologi seismik Castagna et al., 1993. Pada penelitian kali ini digunakan persamaan castagna terkhusus batubara. Dengan persamaan sebagai berikut :

$$V_s = 0.4811V_p + 0.00382 \text{ (km/s)} \quad (17)$$

Persamaan ini didapatkan dari perhitungan laboratorium ultrasonic untuk data (antrasit, semiantrasit, bituminus, cannel, dan bituminus powder) sehingga akan mendapatkan grafik seperti dibawah ini.



Gambar 2.16 V_p vs. V_s untuk perbandingan batubara